単探針法で得た電圧電流特性のデジタルデータ処理

(電気情報工学科) 山崎勉

Digital Data Processing of Current Voltage characteristics Obtained by a Single Probe Method

(Department of Electrical Engineering and Information Science) YAMASAKI Tsutomu

Abstract

Experimental results of a single probe method were recorded as digital data and calculated plasma parameters such as electron temperature and electron density by a personal computer. Data of current voltage characteristics obtained by Langmuir probe in positive column plasma of air glow discharge were digitized by a digital oscilloscope or a data-logger. Availability of these digital processing systems was compared with derivation of plasma parameters by analog circuits system. Digital measuring systems showed good performance than analog system in some respects, speed up of calculating process and making figures of experimental data. But there exist some problems to be cleared that translation of stored data to general type, reduction of noise added in digitizing process, optimal decision of space potential, sufficiently smoothed numerical differentiation to calculate electron energy distribution function by second derivatives.

Key Words: electron temperature, plasma density, Langmuir probe, digital oscilloscope, data logger
電子温度、電子密度、ラングミュア・プローブ、デジタルオシロスコープ、データロガー

§1. まえがき

単探針法はプラズマの基本的特性である電子温度や電子密度の測定に古くからよく利用されている。プラズマに挿入した電極、これを探針(プローブまたは探極)と呼ぶ、に加えた電圧とそれに流れる電流を測定し、ラングミュア解析することにより前述の各量が得られる[1]。またドリュベスティン解析により電子速度分布関数(電子エネルギー分布関数)を測定することもできる[2]。最近では探針と解析用ソフトウェアを組み合わせコンピュータで容易に解析できるシステムが開発され利用されている[3]。しかしその使用には使用する機器に制約があり、自家製の探針ではそれに応じた測定解析系を利用するほうが便利である[4]。そして各種データ処理に汎用ソフトウェアを利用し短時間で大量の解析が可能なパーソナルコンピュータの利用は不可欠であろう。そこでAD変換機能を持つ測定器を利用し、探針の電圧電流特性を記録しパーソナルコンピュータにより解析する方法試みた。ここではその例として、デジタルオシロスコープおよびデータロガーによる測定を実施し、アナログ測定系と比較したのでその結果について報告する。

§2. 測定原理[5]

2.1 ラングミュア解析法[5]

放電プラズマ内の電子と正イオンを考え、それぞれ温度 T_e および T_i[K]、密度 N_e および N_i[m^{-3}]と仮定する。プラズマ内に設置した電極に到達する各荷電粒子の流束密度を J_e および J_i は次の式で表される。

$J_e=N_eV_e/4$, $J_i=N_iV_i/4$

ここで $V_e=\sqrt{(8kT_e/\pi m)}$, $V_i=\sqrt{(8kT_i/\pi M)}$は、マックスウェル分布した電子および正イオンの平均速さ、m, M は電子および正イオンの質量である。プラズマに電圧 V[V]をかけると探針に電荷が吸引または反発され探針電流 I_p[A]となる。

$I_p=eSJ$

ここで、全流束密度 $J=(J_i\cdot\exp(-eV/kT_i)-J_e\cdot\exp(eV/kT_e))$、e は素電荷、k はボルツマン定数、S は探針表面積。グロー放電では $J_e \gg J_i$ の関係がある。さて V>0 の条件では探針電流の内、正イオンによる成分が省略可能となる。

$I_p=-eSJ_e\cdot\exp(eV/kT_e)$

電流の自然対数値 $\ln(I_p)$ と電圧Vの関係から次式により電子温度 kT_e/e [eV]が計算される。

$kT_e/e=|d\ln(|I_p|)/dV|^{-1}$

次に電子密度は電子電流に対し電圧 V の影響がなくなる時(空間電位 V_s に相当)の電流値 $I_{po}=eSN_e\sqrt{(8kT_e/\pi m)}/4$ より計算され、次式となる。

$$N_e=I_{po}/[eS\sqrt{(kT_e/2\pi m)}]$$

2.2 ドリュベスティン解析法[6]

電子速度分布関数を f(v)、探針電圧 V とする時、電子反発電界がある場合プラズマから探針に入射し探針電流となるためには電子はある大きさ以上の速度を持たないと探針に到達できない。 電子速度分布関数の等方性成分に着目する時、探針に捕集される電子電流は次の式で表される。

$$I_p=\frac{eS}{4}\int_{\sqrt{\frac{2eV}{m}}}^{\infty}vF(v)\left(1-\frac{2eV}{mv^2}\right)dv$$

この探針電流の二次微係数は分布関数に比例する。

$$F(v)=4\pi v^2 f(v)=\frac{4m}{e^2S}V\frac{d^2I_p}{dV^2}$$

二次微分係数の測定はいくつか提案されている[6]。

§3. 実験装置と方法

3.1 測定系

アナログ回路による測定系は以前の測定報告[7]に示している。探針の電圧電流特性測定は可変直流電源、電流計と電圧計のみでも可能であるが発信器、直流増幅器、直流バイアス電源と記録計器、たとえばＸＹレコーダやペンレコーダなどを利用すると測定の自動化ができる。記録計器の代わりにデジタルオシロスコープなどを用いればこの後の解析が容易になる。探針に印加する可変電圧の周期または周波数は増幅器または測定器の周波数帯域で制限される。ここで使用した直流増幅器では 30kHz までであるが、アナログ系で使用した直流電子電流計の低域通過域が 0.3Hz のためこれより低い 0.1Hz または 0.01Hz の三角波を使用した。この周波数は増幅器と測定器の周波数特性を変えれば高速測定も可能になる。

直流安定化電源(菊水電子 PDM35-3 最大電圧 70V)と直流増幅器(菊水電子 POW35-1 最大±35V)により直流可変電圧をつくり、探針と陽極の間に印加した。500Ω の抵抗は直流電子電流計の代わりに電流電圧変換の役割を果たす。直流増幅器への入力信号はファンクションジェネレータ(岩通 FG-330)からの三角波を使用し、0.01Hz(または 0.1Hz)では周期 100 秒(10 秒)でこの半サイクル強の時間で測定は完了する。

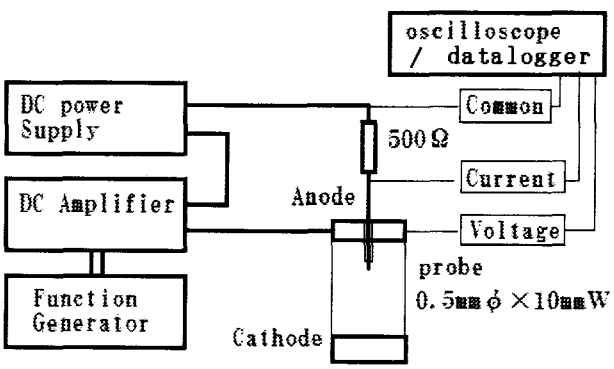


Figure 1 Measuring system of single probe method

3.2 実験装置

実験に使用した放電プラズマはグロー放電陽光柱プラズマである。この陽光柱プラズマ内の電子は熱平衡からのずれが小さく、比較的放電雑音も少ないと考えられる。使用した探針は直径 0.5mm のタングステン線を外径 1.2mm のセラミック管で覆い長さ 10mm 金属部分をプラズマ中に露出して陽極側から挿入した。放電管外部から電流導入端子を通して使用した。油回転ポンプで排気し、低気圧空気プラズマを直流グロー放電により生成した。

3.3 放電管とプラズマ形状

直径 70mm(内径 66mm)長さ 500mm のガラス管の両端を鉄製のガラス管保持器で支えた。ガラス管保持器には 18mmφ 用ゲージポートが各１つずつあり、そこにピラニ真空計と銅管・バルブ経由して真空ポンプに接続した。電極は 3/4 インチ・ステンレス鋼管製中空電極を陰極(長さ 100mm)・陽極(長さ 150mm)とし冷陰極放電した。電極間隔およそ 400mm、ホロー陰極から放出される電子のビーム性が強いことと放電気体が空気のため定在縞の発生が観測された。その影響の小さい陽極付近を利用し、探針測定の参照電極として陽極を使用した。陽極降下電圧は陰極降下電圧に比べ小さいことから、探針回路のバイアス電圧が小さくてすむことからも有利である。 放電電源は直流安定化高圧電源(グラスマン EW1R600)を使用し、1.5kΩ 安定化抵抗と放電電極を直列接続した。放電電圧と放電電流の測定は放電電源付属の計器を利用した。 真空排気は油回転ポンプ(徳田 MG-50A 50L/min) 放電管ゲージポート#2 に接続して行い、ピラニ真空計(AVP202N 岡野製作所)を放電管ゲージポート#1 に接続した。排気開始から５分以内に 30Pa 程度に到達した。

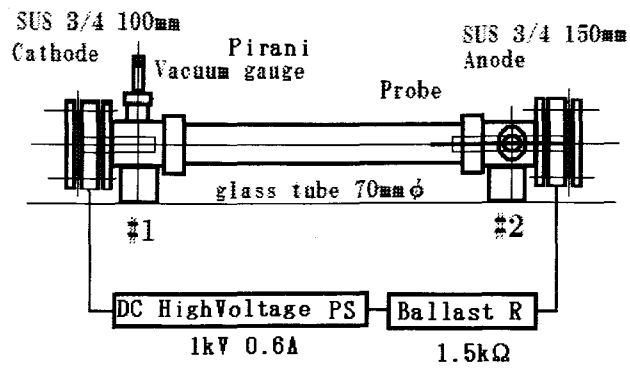


Figure 2 Experimental set up, discharge tube and a probe

3.4 測定器の概要

デジタルオシロスコープとデータロガーの性能について、ともに2チャンネル・オシロスコープとしての機能に観測データをデジタル信号として保存する機能を追加したものである[8,9]。垂直感度とAD変換の性能、時間掃引速度とサンプリングレートなど多少異なるが本実験ではほぼ同等に使用できる。

・　デジタルオシロスコープ(横河 DL1520L)基本仕様[8]

2CH オシロスコープ、垂直分解能 8bit、サンプリングレート 2S/s-200MS/s 以下(1CH のみ使用時)、ストレージ周波数 DC-150MHz(同左)、垂直感度 2mV/div-5V/div、横軸 5ns/div-50s/div、ミニフロッピー出力仕様(BIN/ASCII)独自形式*.WVF、XY 表示可能(データ保存 save はできない)

・データロガー(NF 回路設計ブロック EZ5840)基本仕様[9]

2CH オシロスコープ/データロガーモード、入力波形を連続的に記録、サンプリングレート 1S/s-44.1kS/s、入力レンジ ±1V、±10V、A/D 変換器 16 ビット(2ch 同時サンプリング時)、周波数特性 DC-10kHz、USB 接続にてパソコン HDD 上に独自形式ファイル*.ddt、縦軸 1E-9-1E+9(オシロスコープ 10mV/div-5V/div)、横軸 0.5ms/div-2hour/div(オシロスコープ-1s/div)

両測定器ともパソコンでデータ処理をするのでパソコン(富士通 FMV-BIBLO　NB12A)は共通で使用した。

§4. 実験結果と検討

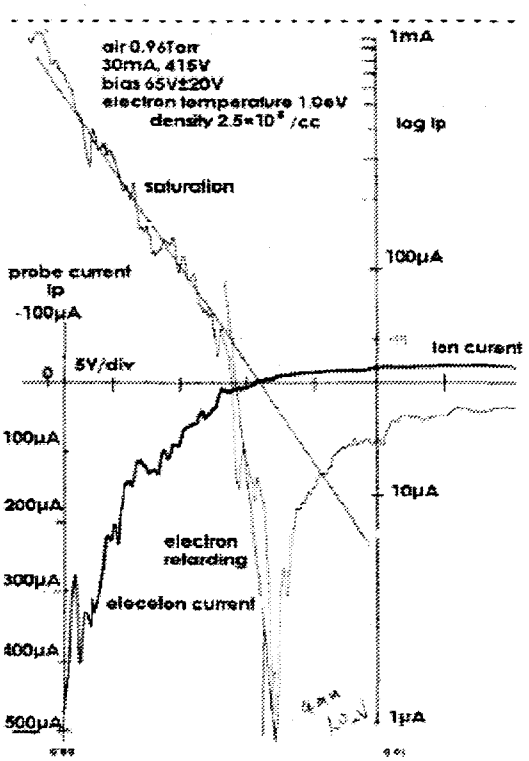


Figure 3 An example of probe characteristics measured with analog circuits system

4.1 アナログ回路による測定

探針の電圧電流特性の測定例を図3に示す[7]。横軸は電圧 5V/div。縦軸左に平等目盛で表した探針電流(100μA/div)で、右中央のイオン電流 20μA から探針電圧が変化(左方向に移動)するに従い電流値零を通過した後、電子電流領域に入り指数関数的に電流値は増加している。縦軸右側の目盛は対数変換した電流値を表し測定範囲は3桁、イオン電流と電子電流ともその大きさが記録されている。電子飽和電流域と電子反発域に近似曲線を引くとその交点の電圧が空間電位であり、このときの電流値を使用して電子密度を算出した。

測定系は直流計器が制約条件となり 50 秒程度の測定時間を要する。ペンレコーダは応答速度(グラフテック SR6310 最大ペン速度 1000mm/s　記録幅 250mmFull-scale)、プラズマパラメータの算出には電流値の目盛付けが必要である。また数値読み出しは記録した曲線から読み取ることでしかできない。ただし、ペンレコーダで記録しているため二本の記録曲線は電圧軸に対して一定間隔(5mm)ずれている。片対数表示の曲線より、電子飽和電流と電子反発電流の近似曲線を目視で決定し、二本の直線の交点から電流値を決定し電子密度の算出に利用した。

4.2 デジタルオシロスコープによる記録

オシロスコープ記録画面は時系列であり、XY 表示はデジタルオシロスコープでは観測できるがその直接記録は不可能である。測定結果は時系列の記録として保存する。デジタルオシロスコープとして記録したデータを EXCEL で図示した結果を図 4 に示す。波形データをフロッピーディスクに保存する手順は次のとおりである[8]。

1.SHIFT+STORE/RECALL(FILE)キーを押してデータセーブ/ロード設定メニューを表示
2.オートネーミングを設定 on(/off)する　AutoFile-on/off
3.P-P データ波形をセーブ/ロードする
4.SAVE 設定メニューの表示
5.Source のセーブ対象波形の選択(TACE1/TRACE2/ALL)
6.EXEC セーブの実行

両測定器ともアナログ系のような積分機能は特別に設定する必要があり、記録したデータ数が多くまたそれらは広い範囲に分布する。電流値が大きくなるにつれ値の分布する幅が広がっている、電圧は三角波のほぼ半周期分が 70V から 10V の範囲で表示されている。電圧値も数値データとして得られた記録を見ると単調な変化とは言えず、雑音のため有効数字 2～3 桁目で増減があった。サンプルレートは 10S/s であった。

得られたデジタルオシロスコープのデータは、パソコン内の Data-view(MFC-Application　横河提供のフリーソフト)により WVF ファイルから CSV ファイルに変換する。それ

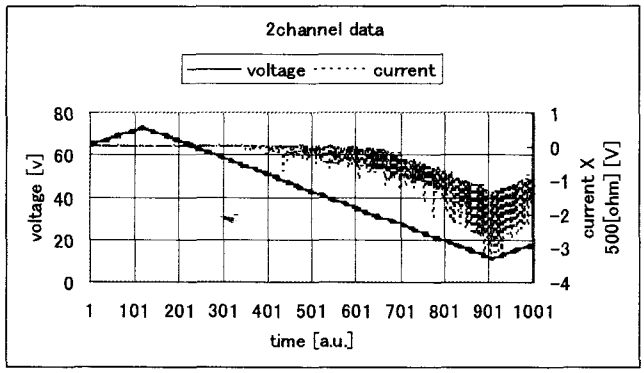


Figure 4 Review of EXCEL data displayed on a digital oscilloscope

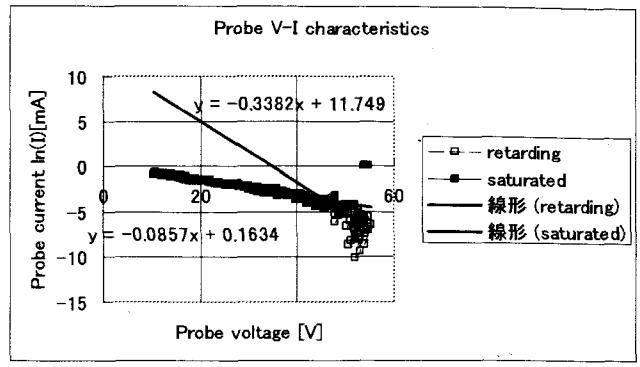


Figure 6 Semi-log plot of electron current obtained from digital oscilloscope

を EXCEL に移した後、数値データに変換し解析を始めることが可能となる。

次に図 4 より横軸を電圧、縦軸を電流として示したのが図 5 である。ただし電流値は得られたデータの近隣5個の平均値を求め、自然対数で変換した後の値を示している。図 3 で示したアナログ系の結果と比べ探針電圧 60V 付近の低電流値におけるデータ数が少ない、これは測定感度設定の調整不足と考えられる。この高電圧側は正イオン電流で 58V 以下の領域が電子電流である。

雑音電圧程度に電流値が小さくなると信号対雑音比が悪化し、データの分布が広くなっているのが分かる。次に電子電流領域に注目し、その領域を図示したのが図 6 である。

両近似直線の交点は空間電位 V_s=46.3V、I_{po}=2.03mA、電子反発領域の直線の傾きの逆数より電子温度 T_e=2.96eV、また電子密度は $2.34\times10^{15}m^{-3}$ となった。このときの放電条件は空気 30Pa 放電電流 60mA 放電電圧 700V である。

4.3 データロガーによる記録

さて、データロガーによる測定結果について以下に述べる。記録されたデータは 2CH の時系列であり、データ形式は *.ddt である。これはデータロガー付属の変換ソフトにより必要な部分を CSV データに変え取り出せる。すなわち波形データを読み込み出し(図 4 相当の表示)、パソコン画面上でそれを見ながら変換する範囲を指定、さらにデータ形式を指定してデータを保存することで変換が完了する。その後の EXCEL 処理はデジタルオシロスコープの場合と同じである。ただし測定に使用した三角波周波数 0.1Hz、サンプルレートは 100S/s とし摘録するデータ数を制限した。図 5 に対応してデータロガー出で得られた結果を図 7 に示す。放電条件は空気 30Pa、放電電流 60mA、放電電圧 680V である。測定回路は図 5 の場合と同様、電流値は近接5データの平均値を使用した。三角波周波数 0.1Hz 大きさ±30V、直流バイアス電圧 18V である。図中 15V 以上が正イオン電流、それ以下は電子電流を表す。サンプリングレートの増加とバイアス電圧の調整により図 5 の場合より低電流域データが得られている。

次に電子電流領域の片対数表示を図 8 に示す。電子温度 Te=0.922eV、空間電位 Vs=10.3V、電子密度 $Ne=1.36\times10^{15}m^{-3}$ となった。低電流領域の測定点数(100S/s)がデジタルオシロスコープの場合(10S/s)より多くなり、電子温度の測定精度が良くなったためと考えられる。問題点として、空間電位の決定には主観が入る余地が残されている。ここでは描かれた片対数表示を見て二つの近似曲線の交点を推定し、

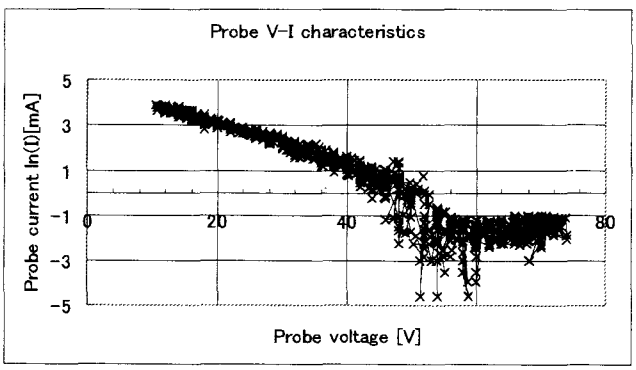


Figure 5 Relation of voltage and current of probe characteristics, current shown in logarithm

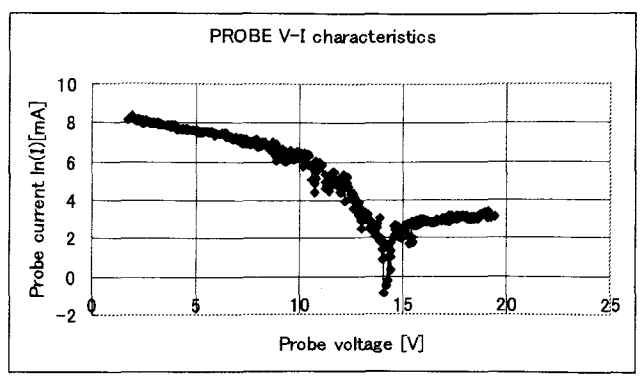


Figure 7 Semi-log plot of probe current obtained from data logger

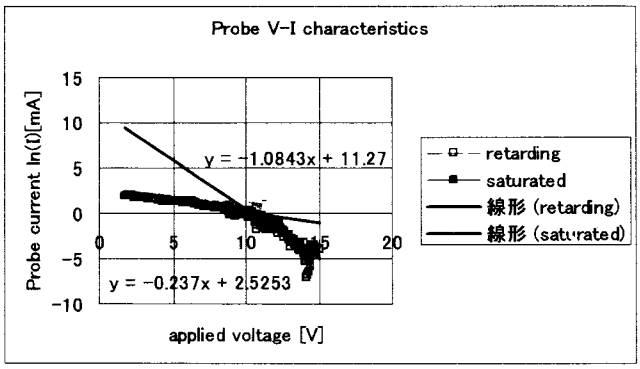


Figure 8 Semi-log plot of electron current obtained from data logger

その電圧値を境にデータ領域を分割し近似直線を描き、得られた直線(近似式)の交点とはじめに推定した交点が一致するようにこの手順を繰り返した。

4.4 測定結果の吟味

陽光柱プラズマに関するショットキー理論によると気圧P[Torr]、プラズマ半径R[cm]、電子温度V_e[eV]の電離電圧V_i[eV]に対する比を$Xi=V_e/V_i$とする時、次式が成立する。

$(1+2Xi)\exp(-1/Xi)/\sqrt{Xi}=(1/cPR)^2$

ここで気体固有の定数 $c=75.58(Torr^{-1}cm^{-1}$ 窒素)、$V_i=15.576eV$ である[10]。P=30Pa、R=3.3cm 空気の c はふめいなので代わりに窒素分子中と仮定すると電子温度 1.66eV となり上記の二つの計算結果の中間値であり、比較的良い一致を示すことが分かる。

また、このとき放電電流は次式で計算される。

$I_d=1.36R^2eN_e\mu_e(E/P)^{0.75}$

放電管軸上の電子密度 N_e、電子の径方向空間分布は零次のベッセル関数 $J_0(r/R)$で表されている。空気中電子の移動度 $\mu_e=8.8\times10^5cm^2/sV/Torr$、ただし移動速度は換算電圧(E/P)の 3/4 乗に比例する[11]。陽光柱プラズマ内軸方向電界強度 E は放電電圧680Vから陰極降下約300Vを引き陽光柱の長さ約 30cm として E=12.7V/cm、動作気圧 P=30Pa とすると I_d=58mA となり、実験値60mAとほぼ一致していることから得られた電子密度の妥当性が確認できる。

§5. まとめ

単探針法のデータ解析の迅速化を目指して測定結果をデジタル記録し、表計算ソフトによる解析を行った。データ記録にはデジタルオシロスコープ及びデータロガーを使用しその操作性について比較した。

測定器独自のデータ形式が採用されているため、データ形式変換が両器ともに必要であった。最近 GPIB をパソコン USB 端子で使用できる機器が開発され、将来これを利用することも検討に値する。測定と同時に電圧電流特性が観測されるほうが便利であるが、その機能は両者とも付属されていない。ただしデジタルオシロスコープではXYスコープ機能があり観測のみか記録するかを判定するには便利である。データ量が大きくなると実にフロッピーディスクの利用は不利で、パソコンのハードディスクに直接保存できるデータロガーの利用が便利である。AD 変換されたデータに含まれる雑音対策は両器とも重要である。データの処理方法は表計算ソフト Excel を利用すれば容易にできた。雑音で分散したデータの平滑化には近接データによる平均値を用いたがもっとほかの方法の利用を検討する必要を感じた[4]。片対数表示や近似直線の導出などにも便利に使用でき、電子温度や電子密度の算出に利用した。一方、二次微係数による電子エネルギー分布関数の導出には数値微分が必要であるが、現状では雑音が大きく影響し残念ながら困難と判定せざるを得ない。

空間電位の決定それに続く電子密度の計算に必要な近似直線の自動決定はできていない。空間電位は二次微係数が零となる点に対応することが知られおり微分処理の安定性が得られれば今後の改善が期待される。その他、探針電流に含まれる正イオン電流成分を電子電流成分に比べ小さいとして省略したがその補正を考慮する場合、複探針など異なった解析法でも用意に解析できるか検討することは今後の課題である。

本実験の一部は平成17年度電気情報工学科4学年、佐々木孝一君、中田昌史君、藤井明徳君、横山恭二君の工学演習として行われたことをここに記し4名の努力に感謝します。

参考文献

1) I. Langmuir and H. Mott-Smith: G. E. Rev. 27, p449, 538, 616, 762, 810(1924)

2) M. J. Druyvesteyn: Z. Phys. 64, 790(1930)

3) M. Hopkins and W. Graham:" Langmuir probe technique for plasma parameter measurement in a medium density discharge", Rev. Sci. Instrum., 57, 2210(1986)

4) J. Andreu, G. Sardin, A. Llorett, J. Esteve, and J. L. Morenza:" Distribution of electron energy in an electrostatically confined silane plasma", J. Appl.Phys. 63(4) p1230 (1988)

5) 奥田孝美「気体プラズマ現象」1975 コロナ社,p157,167

6) 雨宮宏「プラズマ中電子エネルギー分布のプローブ測定法」日本物理学会誌 39(2), 119(1984)

7) 山崎勉、呉高専研究報告 30(2),45(1995); 22(1)71(1986)

8) デジタルオシロスコープ DL1520L 取扱説明書

9) データロガーEZ5820 取扱説明書

10) 電気学会放電ハンドブック編集委員会「放電ハンドブック」電気学会(1978)p115,110

11) 玉河元(編集)実験物理学講座 19「放電」共立出版(1975)p18